



دانشگاه گوارن و منابع طبیعی

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و دوم، شماره پنجم، ۱۳۹۴

<http://jwsc.gau.ac.ir>

مقایسه فضای حالت بازسازی شده و آشوبناکی جریان رودخانه نازلوچای در مقیاس‌های زمانی مختلف

ثمین جبیری قره‌باغ^۱، حسین رضایی^۲ و بایرامعلی محمدنژاد^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی منابع آب، دانشگاه ارومیه، ^۲دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه،

^۳استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۳/۲/۳؛ تاریخ پذیرش: ۹۳/۸/۴

چکیده

سابقه و هدف: مطالعه رفتار جریان رودخانه یکی از نیازهای اساسی در برنامه‌ریزی منابع آب می‌باشد. اهمیت شناخت فرایند رودخانه با استفاده از نظریه آشوب در مقیاس‌های زمانی مختلف، جهت پیش‌بینی جریان رودخانه و انتخاب چارچوب مدل مناسب است. جریان رودخانه ماهیت دینامیکی و غیرخطی دارد. در سیستم‌های دینامیکی به فضایی که شامل تمامی حالات ممکن برای توصیف یک سیستم دینامیکی باشد، فضای حالت گفته می‌شود. به دلیل عدم دسترسی به معادلات دقیق ریاضی حاکم بر سیستم، دستیابی به فضای حالت دشوار بوده و تمام اطلاعات در دسترس تنها یک سری زمانی اسکالر می‌باشد. بنابراین از روش محاسباتی با برقراری زمان‌های تأخیر بر روی سری زمانی دبی رودخانه برای بازسازی فضای حالت استفاده می‌گردد. هدف از این پژوهش بررسی تأثیر مقیاس زمانی و نوسانات سری زمانی بر تحلیل‌های آشوبی، شامل بازسازی فضای حالت و آشوبناکی سری‌های زمانی می‌باشد.

مواد و روش‌ها: منطقه مورد مطالعه در این پژوهش زیرحوضه نازلوچای واقع در حوضه دریاچه ارومیه (غرب دریاچه ارومیه) است. مساحت حوضه رودخانه نازلوچای ۲۹۱۷/۱۰ کیلومترمربع بوده و متوسط ارتفاع منطقه ۱۷۲۰ متر و شیب خالص رودخانه برابر با ۰/۳ درصد می‌باشد. بر روی رودخانه هیچ‌گونه سد در حال ذخیره‌ای وجود ندارد. اطلاعات مربوط به دبی رودخانه نازلوچای در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه برای دوره آماری از سال آبی ۶۹-۷۰ تا ۸۹-۹۰ از ایستگاه هیدرومتری تپیک به دست آمده است. به منظور مشخص شدن رفتار دینامیکی سیستم و دستیابی به الگوی نظم جریان رودخانه، بازسازی فضای حالت دینامیکی سری زمانی در سه مقیاس زمانی مختلف (روزانه، هفتگی و ماهانه) انجام گرفت. بدین منظور با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل، زمان‌های تأخیر محاسبه گردید. همچنین بعد محاط مناسب از روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب محاسبه شد. تعیین وجود رفتار تصادفی یا آشوبی در جریان رودخانه در سه مقیاس زمانی با استفاده از آزمون بعد همبستگی و نمای هرست صورت گرفت.

یافته‌ها: در این پژوهش دبی‌های اندازه‌گیری شده روزانه، هفتگی و ماهانه رودخانه نازلوچای از مهر سال ۶۹ تا شهریور سال ۹۰ برای بازسازی فضای حالت مورد استفاده قرار گرفت. زمان تأخیر با استفاده از روش میانگین

* مسئول مکاتبه: h.rezaie@urmia.ac.ir

اطلاعات متقابل در مقیاس روزانه ۳۹، هفتگی ۱۸ و ماهانه ۹ محاسبه شد. مقدار بعد محاط به‌عنوان حداقل بعد بازسازی برای توصیف سیستم‌های دینامیکی، از روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب به‌ترتیب روزانه، هفتگی و ماهانه برابر ۲۶، ۸ و ۴ محاسبه گردید. آشوبناکی جریان رودخانه در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه با استفاده از روش بعد همبستگی و نمای هرست مورد ارزیابی قرار گرفت. بعد همبستگی برای سری روزانه ۲/۸، هفتگی ۳/۶۲ و ماهانه ۵/۵۲ محاسبه گردید. نمای هرست به‌ترتیب مقیاس روزانه، هفتگی و ماهانه برابر با ۰/۸۴، ۰/۷۷ و ۰/۷۶ به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: نتایج کسب شده دلالت بر آشوبناکی جریان رودخانه نازلوجای در هر سه مقیاس زمانی دارد.

واژه‌های کلیدی: نظریه آشوب، بعد محاط، بعد همبستگی، نمای هرست

مقدمه

به‌علت پیچیدگی و عدم وجود دانش کافی در مورد فرآیندهای فیزیکی در چرخه هیدرولوژیکی، ساخت مدل‌های آماری و گسترش آن‌ها برای بیان این فرآیندها همیشه مورد توجه مهندسين بوده است. اساس بسیاری از تصمیم‌گیری‌ها در فرآیندهای هیدرولوژیکی و تصمیمات بهره‌برداری از منابع آب بر پایه پیش‌بینی و تحلیل سری‌های زمانی می‌باشد (15). پژوهشگران روش‌های مختلفی را بدین منظور ارائه کرده‌اند که می‌توان به تکنیک‌های رگرسیونی، مدل‌های مفهومی و روش‌های پیچیده‌تر و نوین نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی، برنامه‌ریزی ژنتیک، منطق فازی و... اشاره کرد. در تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی ابتدا سعی بر مدل کردن مکانیسم تصادفی است که منجر به مشاهده سری می‌شود (24). اما به بیان نظریه آشوب^۱ پدیده‌هایی که در مقیاس محلی کاملاً تصادفی و غیرقابل پیش‌بینی هستند، چه بسا در مقیاس بزرگ‌تر کاملاً پایا و قابل پیش‌بینی باشند (10). بنابراین کافی است این پدیده‌های به ظاهر غیرمنظم و تصادفی برای مدت کافی تحت نظر قرار گیرند تا با بررسی حالات سیستم در لحظات گوناگون

زمان، مشخص شود که سیستم مذکور همواره نظم ذاتی خویش را به نمایش می‌گذارد (4). چنین سیستمی به شرایط اولیه بسیار حساس است. به‌طور مثال تغییر جزئی در ورودی‌های سیستم، باعث دگرگونی‌های عظیم در رفتار آینده سیستم خواهد شد. به‌عبارتی آشوب، یک رفتار طولانی‌مدت غیرپریودیک و غیرخطی در یک سیستم معین^۲ است که وابستگی حساس به شرایط اولیه را نشان می‌دهد (16). تقریباً اولین پژوهش‌های عددی که به معرفی فراگیر آشوب انجامید توسط ادوارد لورنز ارائه شد (22). لورنز دانشمند ریاضی‌دان و هواشناس آمریکایی هنگام شبیه‌سازی آب و هوا متوجه حساسیت شدید معادلات به شرایط اولیه گردید. به‌طوری‌که کوچک‌ترین تغییر پارامترهای اولیه آب و هوا، موجب دگرگونی‌های عظیم در الگوهای آب و هوایی می‌گردد. بنابراین می‌توان گفت با مشخص بودن شرایط اولیه، رفتار سیستم قابل پیش‌بینی و معین خواهد بود. پس از هواشناسی این دیدگاه وارد علوم دیگر شد. از جمله مطالعات صورت گرفته برای استفاده از نظریه آشوب در زمینه بررسی جریان رودخانه می‌توان به این موارد اشاره کرد:

1- Chaos theory

2- Deterministic

نهایت به پیش‌بینی رواناب اقدام کردند که نتایج بیانگر مناسب بودن استفاده از روش غیرخطی (مبتنی بر نظریه آشوب) برای پیش‌بینی رواناب پویا است (33). قاهری و همکاران (2012) با استفاده از نظریه آشوب به ارزیابی جریان روزانه رودخانه اهرچای پرداختند. نتایج نشان از آشوبناک بودن جریان روزانه و کارایی مناسب مدل تقریب موضعی بر پایه بازسازی فضای حالت، در پیش‌بینی سری زمانی جریان رودخانه داشت (8). نظر به این‌که بازسازی فضای حالت¹ دینامیکی سری زمانی جریان رودخانه گام مهم و اساسی در به‌دست آوردن الگوی نظم از میان رفتار تصادفی سری زمانی و در نهایت پیش‌بینی رفتار سیستم است، در این مطالعه به معرفی مفاهیم اولیه نظریه آشوب پرداخته و به‌منظور بررسی تأثیر مقیاس زمانی و نوسانات سری زمانی بر تحلیل‌های آشوبی، فضای حالت سری زمانی جریان رودخانه نازلوجای در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه بازسازی خواهد شد. همچنین بررسی آشوبناکی سری‌های زمانی با استفاده از دو روش آزمون بعد همبستگی² و نمای هرست³ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

سیستم‌های دینامیکی آشوبی: یک سیستم دینامیکی N بعدی را می‌توان با استفاده از N معادله دیفرانسیلی درجه یک با N متغیر $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ توصیف کرد. به‌طوری‌که تکامل سیستم در طول زمان مشخص شود. به‌عبارت دیگر سیستم دینامیکی را می‌توان با استفاده از نمودار فضای حالت که سیر تکامل سیستم را از چند حالت اولیه نشان می‌دهد، نمایش داد. در نمودار فضای حالت سیر تکامل سیستم توسط مسیرهای حالت⁴ یا مدارهایی نمایش

استهلیک (1999) به بررسی آشوب‌پذیری دبی روزانه رودخانه پرداخت. در این پژوهش با توجه به مفهوم تأخیر زمانی، دو سری از داده‌های دبی رودخانه اولریسکا در جمهوری چک، با مدت تأخیر زمانی مختلف، جهت بررسی امکان رفتار آشوبناک داده‌ها و برآورد تأثیر مدت زمان تأخیر در ماهیت جاذب‌های متناظر تجزیه و تحلیل شدند (36). خان و همکاران (2005) با استفاده از روش بعد همبستگی به بررسی رفتار آشوبی در داده‌های هیدرولوژیکی با تعداد کم (دوره آماری کوتاه‌مدت) پرداختند. نتایج بیانگر اطمینان‌بخش بودن این روش در مطالعه آشوبناکی سری‌های زمانی با تعداد کم بود. آن‌ها امکان وجود سیگنال‌های آشوبی در سری‌های زمانی محدود را بررسی کردند و نشان دادند که داده‌های هیدرولوژیکی محدود هم می‌توانند رفتار آشوبناکی از خود نشان دهند (19). سیواکومار و همکاران (2007) تحلیل‌های آشوبی جریان رودخانه را بر روی نواحی جغرافیایی مختلف (با شرایط آب و هوایی و اندازه حوضه متفاوت) انجام دادند. برخی رودخانه‌ها رفتار تصادفی از خود نشان دادند. بنابراین به این نتیجه رسیدند که امکان تعمیم نتایج یک منطقه به منطقه دیگر وجود ندارد (35). پژوهشگران دیگری نیز تأثیر پارامترهای مختلف بر روند تحلیل‌های آشوبی سری‌های هیدرولوژیکی را بررسی کردند. از جمله می‌توان به رگوندا و همکاران (2004)، کوجاک و همکاران (2007) و سالاس و همکاران (2005) اشاره کرد (20, 27, 28). هدف نهایی در تحلیل‌های سری زمانی، ارائه یک مدل مناسب برای پیش‌بینی سری‌های زمانی است. به‌طور مثال سیواکومار و همکاران (2001) با استفاده از بازسازی فضای حالت رواناب ماهانه بر روی حوضه گوتا واقع در شمال برزیل در

- 1- Phase space reconstruction
- 2- Correlation Dimension
- 3- Hurst exponent
- 4- Trajectory

دینامیکی سیستم در دست نیست، می‌توان با استفاده از بازسازی فضای حالت سیستم از روی یک سری زمانی تک‌متغیره به دینامیک حاکم بر این فرآیندها دست یافت. روش متداولی که عموماً بدین منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش محاسباتی تاکنز می‌باشد (37). تئوری تاکنز بیان می‌کند اگر سری زمانی از یک سیستم دینامیکی معین به دست آمده باشد، آن‌گاه بازسازی فضای حالت این سیستم، به کمک همین سری زمانی $x_t = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ و با ایجاد تأخیرهای زمانی به اندازه τ در m بعد امکان‌پذیر است. ساختار فضای حالت در جدول ۱ نمایش داده شده است. ستون اول در شکل ماتریسی فضای حالت، سری زمانی اصلی می‌باشد. ستون‌های بعدی با ایجاد تأخیری به اندازه τ نسبت به ستون ماقبل خود، تا m ستون ایجاد می‌گردند. بدین ترتیب هر سطر به‌عنوان مختصات یک نقطه در فضای حالت بازسازی شده در m بعد بوده و با عنوان بردار تأخیر شناخته می‌شود. n طول سری زمانی بوده و در نهایت $n - \tau(m - 1)$ نقطه در فضای حالت خواهیم داشت. بنابراین به‌منظور بازسازی فضای حالت دینامیکی سیستم، نیاز به تعیین دو مولفه زمان تأخیر^۶ τ و بعد محاط^۷ m است.

داده می‌شود. اگر مسیرهای حالت با صرف‌نظر از شرایط اولیه، به یک زیرفضا همگرایی داشته باشند، به آن‌ها جاذب^۱ گفته می‌شود (5). جاذب می‌تواند به صورت نقطه ثابت^۲، حلقه محدود^۳ و چندبعدی باشد. اما باید بعد آن کوچک‌تر از بعد فضای حالت سیستم باشد. جاذب سیستم‌های معین که در آن‌ها پیش‌بینی درازمدت امکان‌پذیر است، دارای بعد صحیح می‌باشد (6). اما وقتی یک سیستم دینامیکی به شرایط اولیه حساس باشد، جاذب آن سیستم دارای بعد غیر صحیح یا فرکتال است. به این جاذب‌ها، جاذب‌های غریب^۴ و به این سیستم‌ها، سیستم‌های دینامیکی آشوبی گفته می‌شود (12). برای توصیف جاذب‌های غریب نیاز به به‌کارگیری هندسه فرکتال است. فرکتال‌ها اشکال بی‌نظمی هستند که خاصیت خودتشابهی^۵ دارند و این بی‌نظمی در مقیاس‌های مختلف تکرار می‌شوند. بنابراین جاذب‌های غریب یافتن نظم در بی‌نظمی را نشان می‌دهند. در جاذب‌های غریب مدارها به هیچ نقطه‌ای همگرا نمی‌شوند ولی از حد معینی هم خارج نمی‌شوند و در همسایگی نقاط خاصی باقی می‌مانند. نکته دیگر عدم برخورد مسیرها با خودشان می‌باشد (1). از این ویژگی‌ها به‌منظور ارائه روش‌هایی برای بازسازی فضای حالت و بررسی آشوبناکی سری‌های زمانی استفاده می‌شود.

مواد و روش‌ها

بازسازی فضای حالت: در یک سیستم غیرخطی، یک سری زمانی تک‌متغیره می‌تواند اطلاعات مربوط به کل سیستم چندمتغیره را به همراه داشته باشد (34). بنابراین در سیستم‌هایی که عملاً تمام متغیرهای

6- Time delay
7- Embedding dimension

1- Attractor
2- Fixed point
3- Limited cycle
4- Strange attractor
5- Self-similarity

جدول ۱- ساختار ماتریسی فضای حالت بازسازی شده از روی داده‌های سری زمانی.

Table 1. The matrix structure of reconstructed phase space of time Series data.

| | 1 | 2 | ... | m-1 | m |
|----------------|-------------------|-------------------|-----|-----------------|-----------------|
| 1 | X_1 | $X_1+\tau$ | | $X_1+(m-2)\tau$ | $X_1+(m-1)\tau$ |
| 2 | X_2 | $X_2+\tau$ | | $X_2+(m-2)\tau$ | $X_2+(m-1)\tau$ |
| . | | | | | |
| . | | | | | |
| . | | | | | |
| k | X_k | $X_k+\tau$ | | $X_k+(m-2)\tau$ | $X_k+(m-1)\tau$ |
| . | | | | | |
| . | | | | | |
| n- $\tau(m-1)$ | $X_{n-\tau(m-1)}$ | $X_{n-\tau(m-2)}$ | | $X_{n-\tau}$ | X_n |

τ بسیار بزرگ انتخاب شود، بردارهای تأخیر به‌طور دینامیکی غیرهمبسته بوده و در این حالت فضای حالت بازسازی شده بسیار پیچیده خواهد بود؛ حتی اگر جاذب واقعی سیستم ساده باشد (2). به‌طور عمده دو روش تابع خودهمبستگی¹ (ACF) و میانگین اطلاعات متقابل² (AMI) به‌منظور تخمین زمان تأخیر به‌کار گرفته می‌شود (7). تابع خودهمبسته وابستگی خطی بین دو سری زمانی که با استفاده از زمان تأخیر از هم جدا شده‌اند را نشان می‌دهد. در روش تابع خودهمبستگی، زمان تأخیری که در آن مقدار ACF یک مقدار خاص آستانه که نشان‌دهنده استقلال خطی باشد، به‌دست آید به‌عنوان زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌شود. آستانه توصیه شده عبارت است از اولین مقدار زمان تأخیر که در آن ACF برابر صفر یا در صورتی که خودهمبستگی به‌طور نمایی تقلیل نماید، مقدار کوچکی حدود $1/e = 0.368$ باشد (14). در روش AMI از تابع میانگین اطلاعات متقابل به‌عنوان یک تابع همبستگی غیرخطی برای تعیین زمان تأخیر مناسب استفاده می‌شود. به‌نحوی که $x(t)$ و $x(t+\tau)$ به میزان کافی از هم مستقل بوده اما حداقل همبستگی ممکن را دارا باشند؛ نه به شکلی که هیچ ارتباطی با

زمان تأخیر: فاصله زمانی بین دو مؤلفه در بردارهای تأخیر، زمان تأخیر می‌باشد. تاکنز قیدی برای تعیین زمان تأخیر در نظر نگرفته است. البته باید توجه داشت که در این قضیه، داده‌ها بدون نویز در نظر گرفته شده‌اند. ولی در عمل ملاحظه می‌گردد که چنین نیست. بنابراین انتخاب زمان تأخیر مناسب در تحلیل‌های بعدی کاملاً مؤثر است و انتخاب دلخواه آن، برای استخراج دینامیک داده‌ها مناسب نیست (25). در سری‌های زمانی آشوبناک امکان وجود دو نوع نویز اندازه‌گیری و دینامیکی می‌باشد. نویز اندازه‌گیری عبارت است از خطای اندازه‌گیری که موجب انحراف داده‌های ثبت شده از مقدار واقعی می‌گردد که مستقل از دینامیک سیستم و مربوط به همان زمان اندازه‌گیری می‌باشد. نویز دینامیکی یک فرایند بازخوردی است که در آن، سیستم در هر گام زمانی با یک مقدار کوچک تصادفی مختل شده و نتیجه آن به گام زمانی بعدی منتقل می‌گردد (5). انتخاب مقدار τ به‌شدت ساختار جاذب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. اگر τ بسیار کوچک انتخاب شود، بردارهای تأخیر بسیار به هم وابسته خواهند بود. به‌نحوی که تمام نقاط حول محور قطری فضای حالت قرار خواهند گرفت و باعث از دست رفتن مشخصات ساختار جاذب خواهند شد. از طرف دیگر اگر مقدار

1- Autocorrelation Function
2- Average Mutual Information

متداول برای تخمین این مقدار می‌توان به روش‌های مبتنی بر هیستوگرام اشاره کرد (30). کارایی روش AMI بستگی به دقت تخمین تابع چگالی احتمال دارد. بنابراین باید در انتخاب تعداد تقسیمات هیستوگرام دقت لازم صورت گیرد (18). در نهایت پس از به‌دست آوردن میانگین اطلاعات متقابل، با رسم نمودار تابع میانگین اطلاعات متقابل به‌زای زمان تأخیرهای مختلف، اولین کمینه نسبی (حداقل نسبت به نقاط همسایه) نمودار به‌عنوان زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌گردد.

بعد محاط: در جاذب‌های غریب مسیره‌های حالت همدیگر را قطع نمی‌کنند، به شرط این‌که در بعد مناسب محاط شده باشند. متداول‌ترین روش تعیین بعد محاط بهینه از سری‌های زمانی آشوبی، روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب می‌باشد. اگر بعد محاط کوچک انتخاب شده باشد، همسایگی تمام نقاط بر روی جاذب به‌علت دینامیک حاکم بر سیستم نمی‌باشد. بلکه ممکن است ناشی از تصویر نمودن جاذب در فضای با بعد ناکافی باشد (17). در این روش در یک فضای m بعدی با در نظر گرفتن بردار $Y_r^n(t)$ به‌عنوان r امین همسایه‌ی بردار تأخیر $Y_i(t)$ خواهیم داشت:

$$Y_1(t) = [x(t), x(t + \tau), \dots, x(t + (m - 1)\tau)] \quad (3)$$

$$Y_r^n(t) = [x(t_r), x(t_r + \tau), \dots, x(t_r + (m - 1)\tau)] \quad (4)$$

فاصله بین دو بردار همسایه بر اساس نرم اقلیدسی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_m^2 = \sum_{i=0}^{m-1} [x(t + i\tau) - x(t_r + i\tau)]^2 \quad (5)$$

اگر بردار $Y_r^n(t)$ یک همسایه واقعی برای بردار $Y_i(t)$ باشد، این همسایگی ناشی از ماهیت دینامیکی سیستم است. ولی اگر این همسایگی در اثر تصویر

یکدیگر نداشته باشند. بنابراین در روش میانگین اطلاعات متقابل زمان رخ دادن اولین مینیمم در تابع میانگین اطلاعات متقابل به‌عنوان زمان تأخیر مناسب انتخاب می‌گردد. در این مطالعه به‌دلیل این‌که روش AMI علاوه بر محاسبه وابستگی خطی بین متغیرها، میزان وابستگی غیرخطی بین دو کمیت غیرخطی را نیز محاسبه می‌کند، از این روش به‌منظور تعیین زمان تأخیر استفاده شده است. اطلاعات متقابل برگرفته از تئوری اطلاعات یا آنتروپی شانون (31) است. بدین ترتیب که با در اختیار داشتن سری مشاهدات $x(t)$ تابع چگالی احتمال $P(x(t))$ قابل محاسبه است. در نتیجه تابع آنتروپی یا تابع اطلاعات $H(x(t))$ به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$H(x(t)) = \left(\sum_{t=1}^N P(x(t)) \log_2 P(x(t)) \right) \quad (1)$$

مفهوم آنتروپی عبارت است از میزان عدم حتمیتی که اندازه‌گیری‌های $x(t)$ به همراه دارد. به بیان دیگر نشان‌دهنده مقدار اطلاعاتی است که از اندازه‌گیری‌ها کسب می‌شود. به‌طوری‌که اندازه‌گیری‌های با احتمال پایین (دور از انتظار) به نسبت اندازه‌گیری‌های محتمل‌تر، اطلاعات بیشتری را در اختیار قرار می‌دهند. حال برای محاسبه وابستگی بین $x(t)$ و $x(t+\tau)$ به‌عبارتی میزان اطلاعاتی که به‌طور متقابل از مشاهدات $x(t)$ و $x(t+\tau)$ (که با τ به هم مرتبط می‌شوند) به‌دست می‌آید، تابع میانگین اطلاعات متقابل (AMI) بین $x(t)$ و $x(t+\tau)$ بدین صورت تعریف می‌گردد (3):

$$AMI = \sum_{t=1}^N P(x(t), x(t + \tau)) \cdot \log_2 \frac{P(x(t), x(t + \tau))}{P(x(t))P(x(t + \tau))} \quad (2)$$

اندازه‌گیری اطلاعات متقابل دو متغیر نیازمند دانستن تابع چگالی احتمال توأم است. از روش‌های

است، عبارت است از تشکیل یک کره حول نقطه‌ای در فضای حالت به‌نحوی که شعاع کره تا جایی که تمام نقاط در فضای مزبور محصور شوند، افزایش یابد (6). در نهایت برای یک فضای حالت m بعدی، انتگرال همبستگی برای نقاط محصور برابر است با:

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i,j} H(r - |Y_i - Y_j|) \quad (8)$$

$$, 1 \leq i \leq j \leq N$$

که در آن، H یک تابع هویساید پله‌ای با $H(u)=1$ برای $u \geq 0$ و $H(u)=0$ برای $u \leq 0$ بوده و همچنین $u=r-|Y_i-Y_j|$ تعداد نقاط در فضای مزبور، r شعاع کره ایجاد شده به مرکز Y_i یا Y_j می‌باشد. برای مقادیر مثبت r ، انتگرال همبستگی $C(r)$ با رابطه ۹ به r مرتبط می‌شود:

$$C(r) \underset{N \rightarrow \infty}{r \rightarrow 0} \approx ar^{D_2} \quad (9)$$

که در آن، α یک ضریب ثابت بوده و D_2 نمای همبستگی می‌باشد که از رابطه ۱۰ به دست می‌آید:

$$D_2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log C(r)}{\log(r)} \quad (10)$$

از آنجایی که تعداد داده‌های یک پدیده هیدرولوژیکی (N) محدود خواهد بود، بنابراین r نمی‌تواند مقادیر نزدیک به صفر داشته باشد. در نتیجه برای محاسبه D_2 از رابطه ۱۰ به صورت حدی برای m های مختلف (بعد محاط)، از قسمت خطی نمودار استفاده می‌گردد. با رسم D_2 در مقابل m ، می‌توان نوع فرایند از نظر قطعی و تصادفی بودن را مشخص کرد. بدین صورت که در فرایندهای تصادفی، D_2 بدون رسیدن به یک مقدار اشباع با افزایش m تغییر می‌نماید، در حالی که برای فرایندهای قطعی مقدار D_2 در یک مقدار معین اشباع شده و روند صعودی خود را از دست می‌دهد (نمودار در یک مقدار مشخص

نمودن از یک فضای با بعد بالاتر به فضایی با بعد پایین صورت گرفته باشد، در این صورت با رفتن از بعد m به $m+1$ این همسایه‌های کاذب از همسایگی بردار $Y_i(t)$ خارج می‌گردند. با افزایش بعد m به $m+1$ ، مؤلفه‌های اضافه شده به بردارهای تأخیر $Y_i(t)$ و $Y_r^n(t)$ ، به ترتیب $x(t + m\tau)$ و $x(t_r + m\tau)$ خواهند بود. بنابراین فاصله بین دو بردار بر اساس نرم اقلیدسی در فضای $m+1$ بعدی به‌طور مشابه به صورت زیر خواهد بود:

$$R_{m+1}^2 = R_m^2 + [x(t + m\tau) - x(t_r + m\tau)]^2 \quad (6)$$

بنابراین فاصله اضافه شده در فضای $m+1$ بعدی نسبت به فاصله دو بردار در فضای m بعدی به صورت زیر خواهد بود:

$$\sqrt{\frac{R_{m+1}^2 - R_m^2}{R_m^2}} = \frac{|x(t + m\tau) - x(t_r + m\tau)|}{R_m} \quad (7)$$

هر گاه عبارت فوق از یک مقدار آستانه فراتر برود، همسایه تحت بررسی کاذب در نظر گرفته می‌شود. این مقدار آستانه حدود ۱۰ تا ۱۵ در نظر گرفته می‌شود. با تعیین وضعیت همسایه‌ها برای هر یک از بردارهای تأخیر به‌ازای بعدهای محاط متوالی، بعد محاطی که در آن تعداد همسایه‌های کاذب به حدود صفر می‌رسد، به‌عنوان بعد محاط بهینه انتخاب می‌گردد (33).

بعد همبستگی: یکی از روش‌های تعیین آشوبناکی سری‌های زمانی، استفاده از بعد همبستگی است. یک فرایند تصادفی دارای ابعاد پیوسته (بی‌نهایت) است. اما یک فرایند آشوبی ابعاد محدودتری دارد. یعنی دارای مجموعه نقاطی است که مسیر زمانی به آن محدود می‌شود. بنابراین می‌توان از روی محاسبه ابعاد یک سری به فرایند ایجادکننده آن پی برد (23). روش بعد همبستگی که توسط امپرشتز (1994) تشریح شده

(۲) محاسبه مقدار نرمال شده داده‌ها
 $(Y_{t,m} = X_{t,m} - E_m, t = 1, 2, \dots, n)$

(۳) محاسبه سری زمانی جدید
 $(Z_{t,m} = \sum_{i=1}^t Y_{i,m}, t = 1, 2, \dots, n)$

(۴) محاسبه دامنه تعدیل شده
 $(R_m = \max[Z_{t,m}] - \min[Z_{t,m}])$

(۵) محاسبه انحراف معیار داده‌ها
 $(S_m = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{i,m} - E_m)^2})$

(۶) محاسبه دامنه تغییر مقیاس داده شده (R_m/S_m) .

(۷) تعیین مقدار متوسط R_m/S_m برای تمامی زیر سری‌ها $(R(n)/S(n) = \frac{1}{d} \sum_{m=1}^d R_m/S_m)$
 هرست رابطه زیر را تعریف کرد:

$$\frac{R(n)}{S(n)} = C n^H \quad (11)$$

که در آن، $\frac{R(n)}{S(n)}$ دامنه تجدید مقیاس شده، C عدد ثابت، n تعداد مشاهدات و H نمای هرست می‌باشد. در عمل می‌توان با رسم نمودار لگاریتم $\frac{R(n)}{S(n)}$ به ازای لگاریتم n و برازش خط مناسب، شیب خط را به دست آورد که برابر با مقدار H خواهد بود. در نهایت با توجه به مقدار H می‌توان پی به نوع فرایند اعم از تصادفی و غیرتصادفی برد.

در شکل ۱ فلوجارتی از مراحل انجام پژوهش نمایش داده شده است. لازم به ذکر است، محاسبات مربوط به بازسازی فضای حالت و بعد همبستگی به کمک بسته seriesChaos نرم افزار R صورت گرفته است.

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده: منطقه مورد مطالعه در این پژوهش زیرحوضه نازلوچای واقع در حوضه دریاچه ارومیه (غرب دریاچه ارومیه) است. مساحت حوضه رودخانه نازلوچای ۲۹۱۷/۱۰

شکسته می‌شود). اگر مقدار اشباع عدد غیرصحیحی باشد، سیستم دارای رفتاری آشوبناک است و مقدار اشباع، بعد فرکتالی یا بعد همبستگی سری زمانی نامیده می‌شود (5).

نمای هرست: نمای هرست، با تعیین وابستگی دوربرد سری‌های زمانی، به بررسی تغییرات غیرخطی طولانی مدت در سری‌های زمانی می‌پردازد که می‌تواند به عنوان معیاری برای تمایز سری‌های تصادفی از آشوبناک، استفاده شود (21)؛ چنان‌که سیستم‌های آشوبی، دینامیک غیرخطی داشته و رفتار طولانی مدتی از خود نشان می‌دهند. این آزمون برای نخستین بار توسط هارولد هرست (1951)، هیدرولوژیست بریتانیایی ارائه شد (11). وی طی مطالعات طراحی مخازن متوجه همبستگی بلندمدت در نوسانات جریان ورودی سدی بر روی رودخانه نیل شد. در حالی‌که جریان ورودی آب در سدها معمولاً تصادفی فرض می‌شدند. وی نشان داد که اگر مقدار نمای هرست H برابر با 0.5 باشد، دلالت بر یک فرایند مستقل و کاملاً تصادفی دارد. در غیر اینصورت فرایند دارای دینامیک غیرخطی است. اگر $0.5 < H < 1$ باشد، دلالت بر یک سری زمانی دوام‌دار با حافظه بسیار طولانی و اگر $0 < H < 0.5$ باشد، دلالت بر بی‌دوام بودن فرایند دارد (13). برای محاسبه نمای هرست، هرست از روش دامنه تجدید مقیاس شده^۱ استفاده کرده است. این روش به این ترتیب است که سری زمانی X به طول N را به d سری زمانی کوتاه‌تر با طول $n=N, N/2, N/4, \dots$ تبدیل می‌کنیم. به نحوی که $N=d \times n$ باشد. برای هر کدام از زیر سری‌های $m=1, 2, \dots, d$ به ترتیب زیر عمل خواهد شد (26):

(۱) محاسبه میانگین برای زیرسری‌های m
 $(E_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i)$

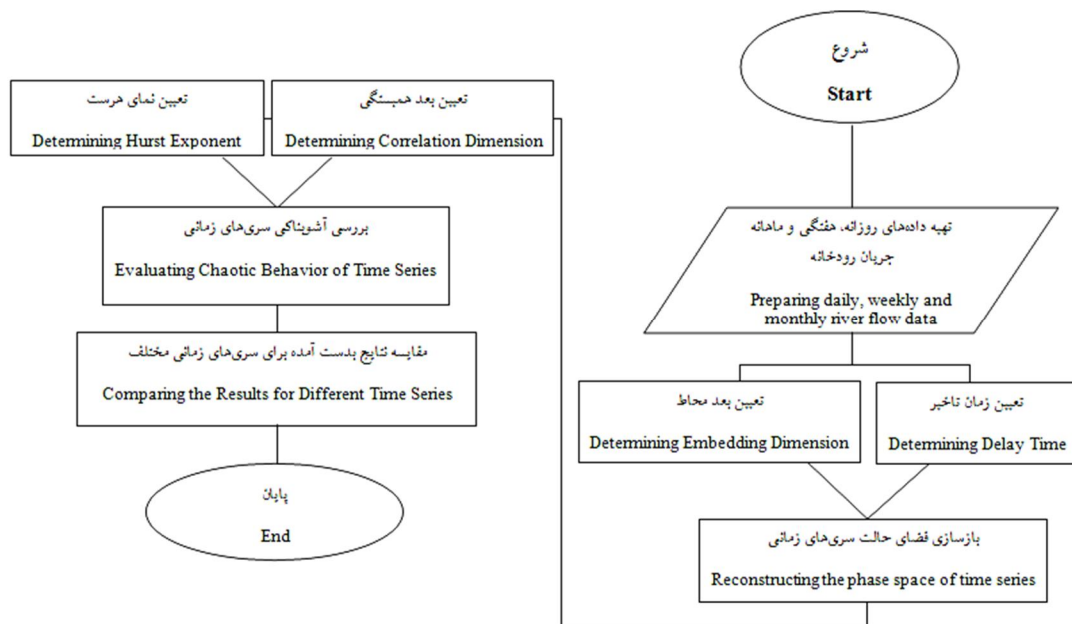
عرض جغرافیایی ۴۴-۵۴ و ۳۷-۴۰ درجه قرار دارد. دوره آماری از سال آبی ۶۹-۷۰ تا ۸۹-۹۰ می‌باشد. مشخصات آماری رودخانه نازلوچای در جدول ۲ و نمودار سری زمانی رودخانه در شکل ۲ آمده است. حداقل دبی مطلق روزانه صفر و حداکثر دبی مطلق روزانه ۷۰/۱۲ مترمکعب بر ثانیه مشاهده شده است.

کیلومترمربع است و متوسط ارتفاع منطقه ۱۷۲۰ متر و شیب خالص رودخانه برابر با ۰/۳ درصد می‌باشد. بر روی رودخانه هیچ‌گونه سد در حال ذخیره‌ای وجود ندارد. اطلاعات مربوط به دبی رودخانه نازلوچای در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه از ایستگاه هیدرومتری تپیک به‌دست آمده است. ایستگاه تپیک در ارتفاع ۱۴۵۰ متری از سطح آب‌های آزاد با طول و

جدول ۲- مشخصات آماری سری زمانی جریان رودخانه.

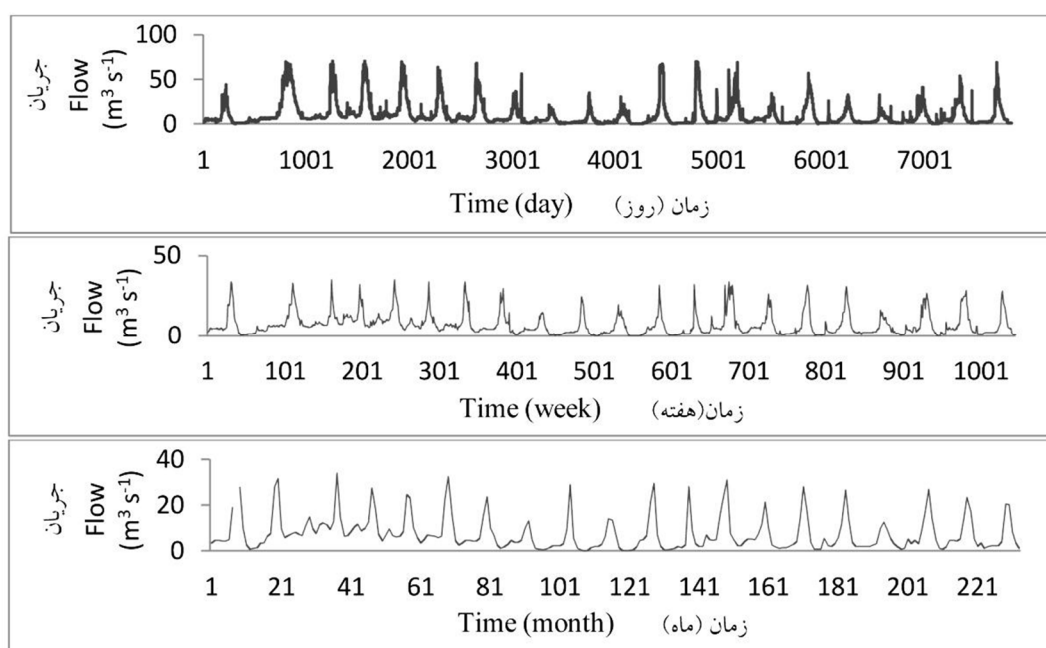
Table 2. Statistical characteristics of river flow time series.

| مشخصات آماری Statistics (واحد دبی: m ³ /s) | تعداد نمونه Number of samples | میانگین Average | انحراف معیار Standard division | ضریب تغییرات Coefficient of variation | حداکثر Maxim um | حداقل Mini mum | ضریب چولگی Skewness |
|---|----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--|--------------------|-------------------|------------------------|
| دبی (Discharge) روزانه (Daily) | 7843 | 10.15 | 13.33 | 1.31 | 70.12 | 0.02 | 2.37 |
| هفتگی (Weekly) | 1046 | 7.14 | 7.11 | 1.00 | 35.07 | 0.01 | 1.74 |
| ماهانه (Monthly) | 233 | 7.47 | 7.53 | 1.01 | 33.87 | 0.01 | 1.67 |



شکل ۱- فلوچارت مراحل انجام پژوهش.

Figure 1. Flowchart of research stages.



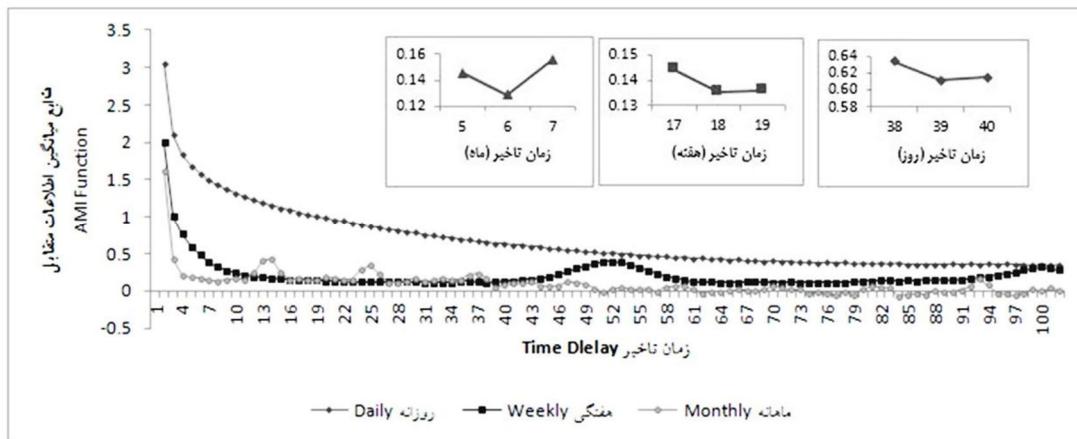
شکل ۲- سری‌های زمانی جریان رودخانه به تفکیک روزانه، هفتگی و ماهانه.

Figure 2. River flow time series for daily, weekly and monthly scales.

ماهانه، جزئیات و اطلاعات بیشتری از جریان رودخانه را در اختیار قرار می‌دهد که در تأیید صحت روند به‌دست آمده برای مقادیر زمان تأخیر می‌باشد. به‌منظور تعیین مقدار بعد محاط مناسب، از روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب استفاده شده است. بدین ترتیب که تعداد همسایه‌های کاذب (همسایگی ناشی از تصویر نمودن جاذب از بعد بالاتر به بعد پایین‌تر) برای ابعاد محاط مختلف به‌دست آمده و در شکل ۴، نسبت نزدیک‌ترین همسایگی کاذب به کل نزدیک‌ترین همسایه‌ها برای ابعاد محاط مختلف، مشخص شده است. بعد محاط مناسب، بعد محاطی است که در آن تعداد همسایه‌های کاذب به حدود صفر رسیده باشد؛ بنابراین برای سری‌های روزانه، هفتگی و ماهانه به‌ترتیب در بعد ۲۶، ۸ و ۴، بعد محاط مناسب به‌دست آمده است.

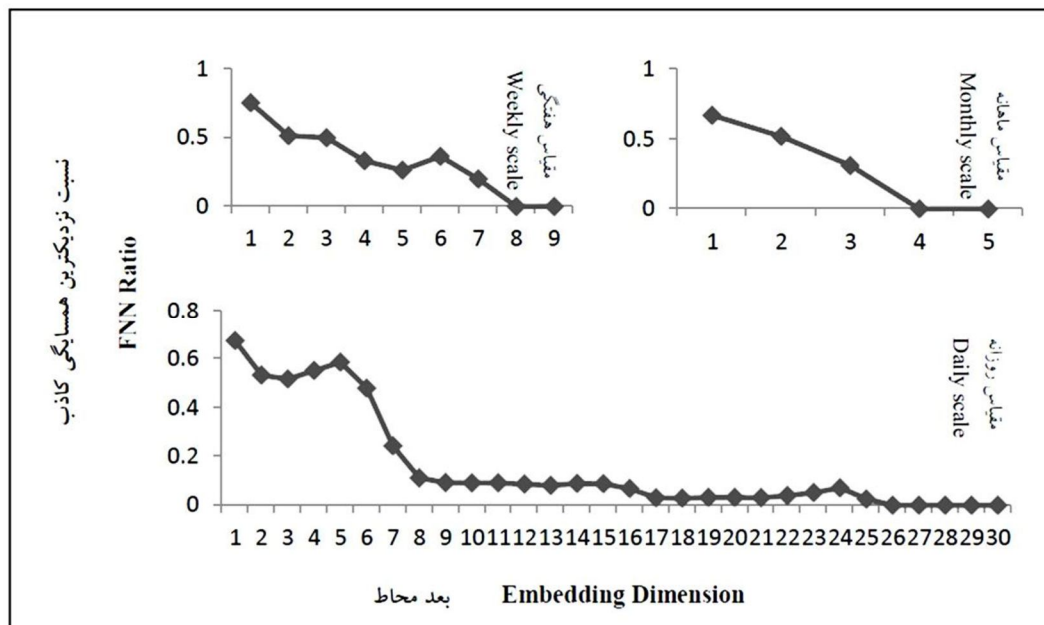
نتایج و بحث

همان‌گونه که در بخش‌های قبل ذکر شد، برای بازسازی فضای حالت نیاز به تعیین دو مؤلفه زمان تأخیر و بعد محاط است. با توجه به شکل ۳ مقدار بهینه زمان تأخیر به روش میانگین اطلاعات متقابل، در مقیاس روزانه، هفتگی و ماهانه به‌ترتیب برابر با ۳۹ روز، ۱۸ هفته و ۶ ماه تعیین شده است. چنان‌که ذکر شد، در ایجاد بردارهای تأخیر، مقدار تأخیر بهینه (τ)، باید به میزانی باشد که مؤلفه‌های متوالی بردار تأخیر، حداقل همبستگی ممکن را دارا باشند. بنابراین مقادیر به‌دست آمده برای سری‌های روزانه، هفتگی و ماهانه بیانگر وجود وابستگی بیش‌تر بین داده‌های روزانه به نسبت هفتگی و ماهانه است. همچنین با توجه به نمودارهای سری زمانی جریان رودخانه (شکل ۲) تراکم داده‌های موجود برای یک دوره آماری یکسان، به‌ترتیب روزانه، هفتگی و ماهانه کاهش یافته است و به‌عبارتی سری زمانی روزانه به نسبت هفتگی و



شکل ۳- تابع میانگین اطلاعات متقابل به‌ازای زمان تأخیرهای مختلف در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه.

Figure 3. The AMI function of different time delays for daily, weekly and monthly scales.



شکل ۴- نسبت نزدیک‌ترین همسایگی کاذب برای ابعاد محاط مختلف در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه.

Figure 4. The FNN ratio of different embedding dimensions for daily, weekly and monthly scales.

برای محاسبه بعد همبستگی قسمت خطی نمودارها که مقدار $\log C(r)/\log r$ در آن‌ها به مقدار ثابتی رسیده است، به‌عنوان ناحیه‌ی مقیاس‌گذاری انتخاب شده و شیب خط‌ها به روش کم‌ترین مربعات به‌دست آمده است. این مقدار برابر با نمای همبستگی به‌ازای بعد محاط مربوطه می‌باشد. نتایج به‌دست آمده در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به شکل ۶ برای هر سه سری زمانی نمای همبستگی بعد از یک روند

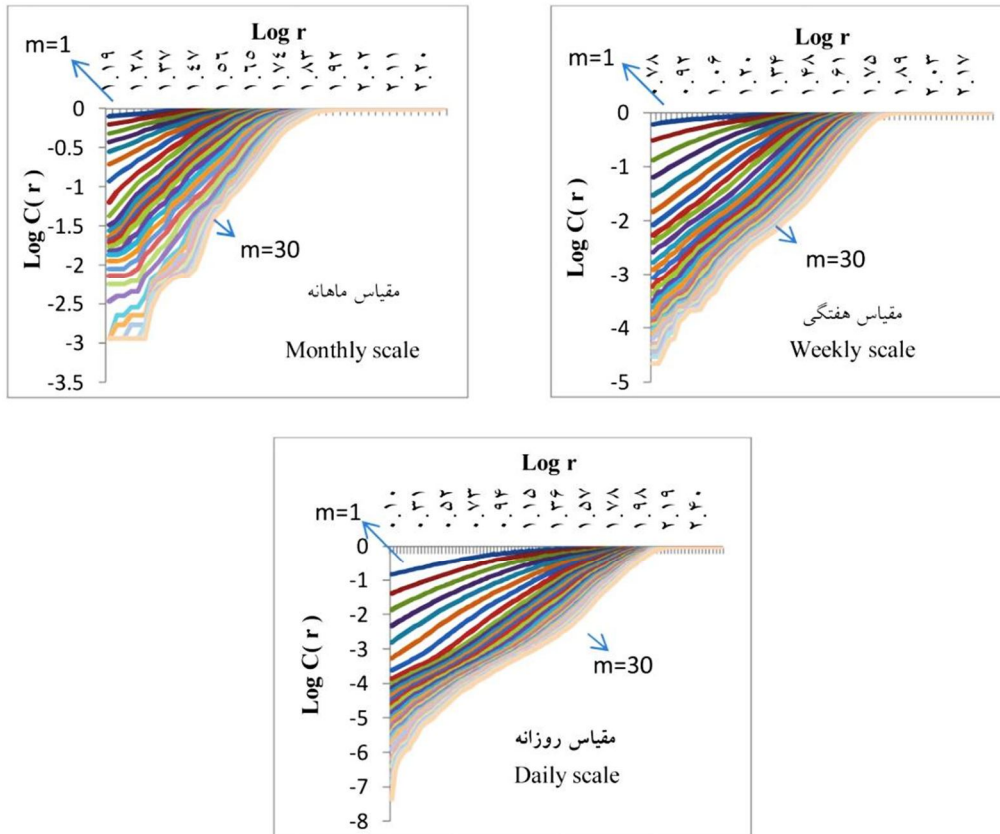
پس از محاسبه عوامل مورد نیاز (زمان تأخیر و بعد محاط) برای بازسازی فضای حالت، باید جهت بررسی آشوبناکی سری زمانی جریان رودخانه به روش بعد همبستگی، انتگرال همبستگی $C(r)$ به‌ازای زمان تأخیر τ به‌دست آمده از روش AMI محاسبه شود. شکل ۵ رابطه بین انتگرال همبستگی $C(r)$ و شعاع r به‌ازای ابعاد محاط m از ۱ تا ۳۰ در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه را نشان می‌دهد.

داست. چنان‌که در روش بعد همبستگی فرض می‌شود سری زمانی نامحدود و بدون نویز است (32). در حالی‌که در عمل و در فرایند جریان رودخانه، داده‌ها محدود و عموماً نویزدار است. بنابراین ممکن است بعد همبستگی برای سری زمانی با وضوح بالاتر (سری روزانه) کم‌تر از مقدار واقعی برآورد شده باشد یا بعد همبستگی سری‌های زمانی با وضوح پایین‌تر بیش‌تر از مقدار واقعی به‌دست آمده باشد. به‌منظور بررسی علل نتایج گمراه‌کننده کسب شده برای بعد همبستگی، باید متذکر شد که داده‌های محدود و کم می‌تواند بعد همبستگی کم‌تری نسبت به مقدار واقعی برآورد کند (9) و وجود نویز می‌تواند باعث برآورد بیش از مورد انتظار در بعد همبستگی گردد (29). در این مطالعه اندازه سری زمانی با وضوح بالا (روزانه) به‌میزان قابل‌توجهی بزرگ‌تر از اندازه سری زمانی با وضوح پایین (هفتگی و ماهانه) است. با این حال نتیجه به‌دست آمده برای بعد همبستگی در سری زمانی با وضوح بالاتر به‌میزان قابل‌ملاحظه‌ای کم‌تر از سری‌های با وضوح پایین‌تر است. بنابراین امکان برآورد مقدار کم بعد همبستگی برای سری زمانی با وضوح بالا (روزانه) در مقایسه با هفتگی و ماهانه به‌دلیل اندازه سری زمانی بسیار کم بوده و اندازه سری زمانی در این مطالعه کافی ارزیابی می‌گردد. بررسی تأثیر وجود نویز در روند محاسبات بعد همبستگی در این مرحله از مطالعه به‌دلیل نامشخص بودن نوع و مقدار نویز دشوار می‌باشد. با این حال با توجه به این‌که سری‌های هفتگی و ماهانه از روی سری روزانه استخراج شده است، میزان نویز اندازه‌گیری در آن‌ها می‌تواند به مراتب بیش‌تر باشد. نتایج نشان می‌دهد بالاترین بعد همبستگی متعلق به سری ماهانه می‌باشد. با فرض غالب بودن نویز اندازه‌گیری به نویز دینامیکی، سری ماهانه بیش‌ترین نویز را به همراه دارد. همچنین با توجه به شکل 5 نوساناتی در نمودار

صعودی، پس از یک مقدار مشخص به حالت اشباع در آمده است. این مقدار برابر با بعد همبستگی است. بعد همبستگی برای سری زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه به‌ترتیب ۲/۸۰، ۳/۶۲ و ۵/۵۲ به‌دست آمده است. اشباع شدن نمای همبستگی و مقدار غیرصحيح به‌دست آمده برای هر سه مقیاس زمانی نشان از رفتار دینامیکی معین در جریان رودخانه نازلوچای و آشوبناک بودن سری زمانی جریان رودخانه دارد. بعد همبستگی علاوه بر اینکه معیاری است برای بررسی آشوبناکی سیستم‌ها، به‌عنوان بعد جاذب سیستم و معیاری از تغییرات و پیچیدگی سیستم شناخته می‌شود. بنابراین بعد همبستگی بالاتر نشان از پیچیدگی بالاتر سری زمانی خواهد داشت (35). با توجه به مشخصات آماری سری‌های زمانی (جدول ۲)، سری زمانی روزانه از ضریب تغییرات بالاتری نسبت به سری‌های هفتگی و ماهانه برخوردار است و نیز همانطور که از نمودار سری‌های زمانی (شکل ۲) مشخص است، هر چند هیچ‌یک از سری‌ها الگوی مشخصی از خود نشان نمی‌دهند و پیچیده و نامنظم به‌نظر می‌رسند، اما سری زمانی روزانه جزئیات بیش‌تری از جریان رودخانه نسبت به سری هفتگی و ماهانه نمایش می‌دهد و از نوسانات بیش‌تری برخوردار است. همچنین بنا به مقادیر به‌دست آمده برای بعد محاط (مقدار بعد محاط روزانه به مراتب بزرگ‌تر از بعد محاط هفتگی و ماهانه) انتظار می‌رود سری زمانی روزانه نسبت به سری هفتگی و ماهانه از پیچیدگی و بی‌نظمی بیش‌تری برخوردار باشد. بنابراین باید بعد همبستگی سری روزانه بزرگ‌تر از سری هفتگی و ماهانه باشد. اما نتایج به‌دست آمده برای بعد همبستگی در این پژوهش چنین نیست. بنابراین به‌نظر می‌رسد روش بعد همبستگی دارای محدودیت‌های اساسی باشد. محدودیت‌های استفاده از روش بعد همبستگی را می‌توان به‌علت مفروضات این روش

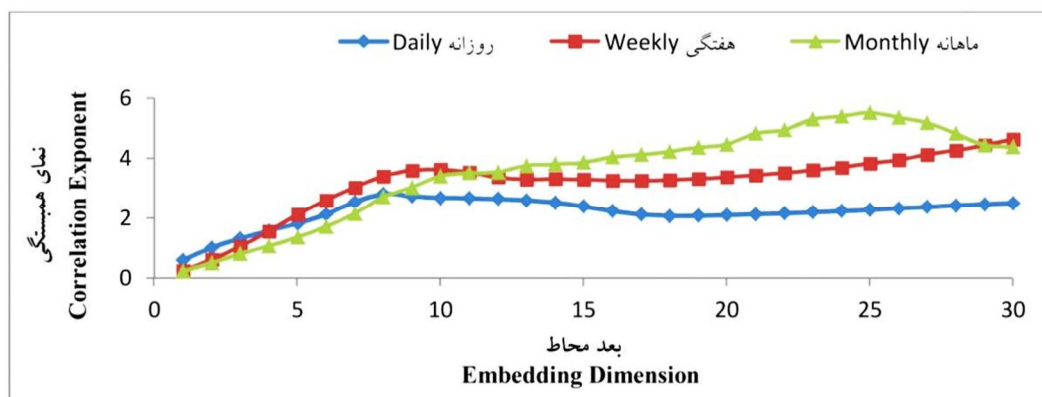
زمانی با وضوح کمتر (ماهانه) به علت نویز به مراتب بیش‌تر از کم‌برآورد بعد همبستگی در سری با وضوح بالاتر به علت اندازه سری زمانی می‌باشد.

به‌زای $\text{Log } r$ های کوچک مشاهده می‌شود که میزان نوسانات در نمودار ماهانه بیش‌تر به نظر می‌رسد. این نوسانات ناشی از وجود نویز در داده‌ها می‌باشد (8). بنابراین احتمال بیش‌برآورد بعد همبستگی در سری



شکل ۵- نمودار $\text{Log } r$ در مقابل $\text{Log } C(r)$ به‌زای ابعاد محاط ۱ تا ۳۰ برای جریان رودخانه در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه.

Figure 5. $\text{Log } C(r)$ versus $\text{Log } r$ plot of river flow series for daily, weekly and monthly scales.

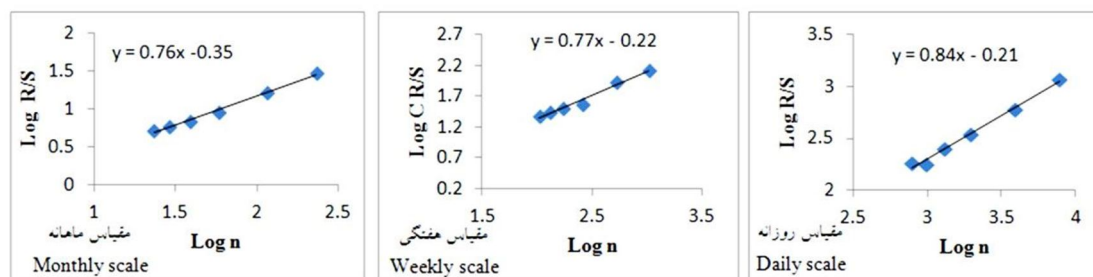


شکل ۶- بعد همبستگی به‌زای ابعاد محاط مختلف برای جریان رودخانه نازلوجای در مقیاس‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه.

Figure 6. Correlation dimension for different embedding dimensions of river flow for daily, weekly and monthly scales.

از رفتار تصادفی و مستقل سری زمانی دارد. بنابراین مقادیر به دست آمده برای هر سه سری نشان از غیرتصادفی بودن رفتار جریان رودخانه در هر سه مقیاس و غیرخطی بودن دینامیک سیستم دارد. همچنین مقدار به دست آمده برای هر سه سری زمانی، بزرگتر از ۰/۵ بوده ($0/5 < H < 1$)، بنابراین بیانگر وجود حافظه طولانی مدت در سری‌های زمانی می‌باشد. غیرتصادفی بودن، دینامیک غیرخطی و وجود حافظه طولانی مدت در سری‌های زمانی، همگی از ویژگی‌های سیستم‌های آشوبناک است. بنابراین هر سه سری زمانی آشوبناک می‌باشند.

به دلیل عدم اطمینان از نتایج به دست آمده به روش بعد همبستگی، استفاده از یک روش دیگر برای بررسی صحت آشوبناکی جریان رودخانه، نظیر روش نمای هرست ضروری به نظر می‌رسد. در این روش برای محاسبه نمای هرست، لگاریتم $[R(n)/S(n)]$ تابعی از لگاریتم n در نظر گرفته شده است. شیب خط برازش داده شده برابر با نمای هرست H است (شکل ۷). مقدار نمای هرست H برای سری‌های زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه به ترتیب برابر با ۰/۸۴، ۰/۷۷ و ۰/۷۵ به دست آمده است. همان طوری که گفته شد بنا به مطالعات هرست، مقدار H برابر با ۰/۵ نشان



شکل ۷- نمودار Log R/S مقابل Log n به منظور برآورد نمای هرست.

Figure 7. Log R/S versus Log n plot for Hurst exponent estimation.

همبستگی در هر سه مقیاس پس از افزایش به ازای بعد محاط در یک مقدار غیرصحیح به حالت اشباع رسید. بنابراین نشانگر آشوبناک بودن جریان رودخانه در هر سه مقیاس است. این مقدار اشباع برابر با بعد همبستگی بوده که در مقیاس‌های روزانه، هفتگی و ماهانه به ترتیب برابر با ۲/۸۰، ۳/۶۲ و ۵/۵۲ به دست آمد. این در حالی است که انتظار می‌رفت مقدار بعد همبستگی برای سری زمانی پیچیده تر (روزانه) به نسبت هفتگی و ماهانه بزرگتر به دست آید. بنابراین روش بعد همبستگی به علت وجود نویز و محدود بودن اندازه سری زمانی از محدودیت‌هایی برخوردار است که لازم است مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. البته چنین نتایجی در این سطح از پژوهش مورد تأیید

نتیجه گیری

در این پژوهش به منظور مشخص شدن رفتار دینامیکی سیستم و دستیابی به الگوی نظم جریان رودخانه، بازسازی فضای حالت دینامیکی سری زمانی در سه مقیاس زمانی مختلف (روزانه، هفتگی و ماهانه) انجام گرفت. با استفاده از روش میانگین اطلاعات متقابل زمان تأخیر روزانه ۳۹، هفتگی ۱۸ و ماهانه ۶ محاسبه گردید. همچنین بعد محاط مناسب از روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب در سه مقیاس زمانی روزانه، هفتگی و ماهانه به ترتیب ۲۶، ۸ و ۴ محاسبه شده است. تعیین وجود رفتار تصادفی یا آشوبی در جریان رودخانه با استفاده از آزمون بعد همبستگی و نمای هرست صورت گرفت. نمای

مخالف ۰/۵ بوده و بنا به مطالعات هرست نشان از غیرتصادفی بودن و وجود آشوب در جریان رودخانه دارد. همچنین نمای هرست به دست آمده در هر سه مقیاس بین ۰/۵ تا ۱ بوده و نشانگر وجود حافظه طولانی مدت این سری‌ها است. در نهایت نتایج کسب شده بیانگر امکان استفاده از روش‌های مبتنی بر نظریه آشوب به منظور پیش‌بینی می‌باشد. می‌توان از طریق سری‌های روزانه پیش‌بینی‌های دقیق‌تری برای رودخانه نازلوچای انجام داد و از روش‌های پیش‌بینی غیرخطی مبتنی بر فضای حالت در این راستا استفاده نمود.

می‌باشد. اما بررسی پارامترهایی که این سری‌های زمانی را به هم مرتبط می‌کنند، می‌تواند در مطالعات آتی مفید باشد. به طور مثال پیشنهاد می‌شود توزیع داده‌های جریان در مقیاس‌های مختلف به عنوان یکی از پارامترهای مهم به منظور دستیابی به اطلاعات بیشتر در این زمینه مورد بررسی قرار گیرد. به نظر می‌رسد اگر مطالعات پس از انجام نوین‌زدایی صورت گیرد، نتایج مناسب‌تری به دست خواهد آمد. بنابراین بهتر است مطالعات مربوط به نوین داده‌ها نیز انجام گیرد. نمای هرست به دست آمده برای هر سه مقیاس

منابع

1. Abarbanel, D.I., Brown, R., Sidorowich, J., and Tsimring, L. 1993. The Analysis of Observed Chaotic Data In Physical Systems. *Rev. Mod. Phys.* 65: 1331-1392.
2. Casdagli, M., Eubank, S., Farmer, J.D., and Gibson, J. 1991. State space reconstruction in the presence of noise. *Physica D.* 51: 52-98.
3. Cover, T.M., and Thomas, J.A. 1991. *Elements of Information Theory.* John Wiley & Sons, Inc, New York, 776p.
4. Edward, O. 2002. *Chaos in Dynamical Systems.* Cambridge University Press, New York, 478p.
5. Elshorbagy, A., Simonovic, S.P., and Panu, U.S. 2002. Estimation of missing stream flow data using principles of chaos theory. *J. Hydrol.* 255: 123-133.
6. Embrechts, M. 1994. Basic concepts of nonlinear dynamics and chaos theory, P 265-279. In: Deboeck, G.J. (Ed). *Trading on the Edge.* Wiley, New York.
7. Frazer, A.M., and Swinney, H.L. 1986. Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Phys. Rev. A.* 33: 2. 1134-1140.
8. Ghaheri, A., Ghorbani, M., Delafrooz, H., and Malekani, L. 2012. Evaluation of Stream flow using Chaos Theory. *Iran Water Res. J.* 6: 10. 177-186. (In Persian)
9. Havstad, J.W., and Ehlers, C.L. 1989. Attractor dimension of nonstationary dynamical systems from small data sets. *phys. rev. A.* 39: 845-853.
10. Heidari, T.G., Yousefi, S.R., and Khadivi, A. 2002. A modern attitude toward theories of organization and management in today world. Farashenakhti Andisheh Publications, Iran, 422p. (In Persian)
11. Hurst, H.E. 1951. Long-Term Storage Capacity of Reservoirs. *Transactions of the American Society of Civil Engineers.* 116: 770-808.
12. Jayawardena, A.W., and Gueung, A.B. 2000. Noise reduction and prediction of hydrometeorological time series: dynamical system approach vs. stochastic approach. *J. Hydrol.* 288: 242-264.
13. Jones, C., Lonergan, G.T., and Mainwaring, D.E. 1996. Wavelet packet computation of the hurst exponent. *J. Phys. A: Mathematical and General.* 29: 2509-2527.
14. Kantz, H., and Schreiber, T. 1997. *Nonlinear Time Series Analysis.* Cambridge University Press, UK, 369p.
15. Karamouz, M., and Araghinejad, S. 2005. *Advanced Hydrology.* Amirkabir University of Technology Press, Iran, 465p. (In Persian)

16. Kellert, S.H. 1993. In the Wake of Chaos: Unpredictable Order in Dynamical Systems. University of Chicago Press, Chicago, 176p.
17. Kennel, N., and Brown, R. 1992. Determining embedding dimension for phase space reconstruction using a geometrical construction. *Physica. Rev. A.* 45: 3403-3411.
18. Kevin, H. 2013. Optimal Data-Based Binning for Histograms. Available from: <http://arxiv.org/abs/physics/0605197>.
19. Khan, S., Ganguly, A.R., and Saigal, S. 2005. Detection and predictive modeling of chaos in finite hydrological time series. *Nonlinear Processes in Geophysics.* 12: 41-53.
20. Kocak, K., Bali, A., and Bektasoglu, B. 2007. Prediction of monthly flows by using chaotic approach. International congress on river basin management, 22-24 March, Antalya, Turkey.
21. Lange, H. 1999. Time Series Analysis of Ecosystem Variables with Complexity Measures. *Inter. J. Com. Syst.* 250: 1-9.
22. Lorenz, N.E. 1963. Deterministic non-periodic flows. *J. Atm. Sci.* 247: 194-207.
23. Moshiri, S. 2002. An overview of chaos theory and its applications in economics. *Iran. J. Econ. Res.* 12: 68-29. (In Persian)
24. Niroomand, H.A. 1992. Time Series Analysis. Mashhad University Publication, Iran. 404p. (In Persian)
25. Pari Zangeneh, M., Ataei, M., and Moallem, P. 2009. Phase Space Reconstruction of Chaotic Time Series Using An Intelligent method. *J. Elec. Engin. Dept. Trans. Elec. Technol. (Electronics and Power).* 1: 2. 3-10.
26. Peters, E.E. 1994. Fractal Market Analysis: Applying Chaos Theory to Investment and Economics. John Wiley and Sons Inc, New York, 336p.
27. Regonda, S.K., Sivakumar, B., and Jain, A. 2004. Temporal scaling in river flow: can it be chaotic?. *Hydrol. Sci. J. des Sci. Hydrol.* 49: 3. 373-385.
28. Salas, J.D., kim, H.S., Eykholt, R., Burlando, P., and Green, T.R. 2005. Aggregation and sampling in deterministic chaos: implications for chaos identification in hydrological processes. *Nonlinear Processes in Geophysics.* 12: 557-567.
29. Schreiber, T., and Kantz, H. 1996. Observing and predicting chaotic signals: Is 2% noise too much?, P 43-65. In: Kravtsov, Y.A. and J.B. Kadtko (Eds.), *Predictability of Complex Dynamical Systems Springer Series in Synergetics*, Springer, New York.
30. Scott, D.W. 1992. Multivariable Density Estimation: Theory, Practice, and Visualization, Wiley, New York, 336p.
31. Shannon, C.E. 1948. A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Technic. J.* 27: 379-423 and 623-656.
32. Sivakumar, B. 2001. Rainfall dynamics at different temporal scales: A chaotic perspective. *Hydrology and Earth System Sciences.* 5: 4. 645-651.
33. Sivakumar, B., Berndtsson, R., and Person, M. 2001. Monthly runoff prediction using phase space reconstruction. *Hydrol. Sci. J.* 46: 3. 377-387.
34. Sivakumar, B. 2002. A phase-space reconstruction approach to prediction of suspended sediment concentration in rivers. *J. Hydrol.* 258: 149-162.
35. Sivakumar, B., Jayawardena, A.W., and Li, W.K. 2007. Hydrologic complexity and classification: a simple data reconstruction approach. *Hydrological Processes.* 21: 2713-2728.
36. Stehlik, J. 1999. Deterministic chaos in runoff series. *J. Hydrol. Hydromech.* 47: 4. 271-287.
37. Takens, F. 1981. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Systems and Turbulence, lecture notes in mathematics.* 898: 366-381.



Comparison of reconstructed phase space and chaotic behavior of Nazloo chai river flow at different temporal scales

S. Jabbari Gharabagh¹, *H. Rezaei² and B. Mohammadnezhad³

¹M.Sc. Student, Dept. of Water Resources Engineering, Urmia University,

²Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Urmia University,

³Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Urmia University

Received: 04/23/2014; Accepted: 10/26/2014

Abstract

Background and Objectives: Studying the behavior of river flows is one of the basic requirements in water resources planning. The identification of river flow processes at different temporal scales, using chaos theory is important for river flow prediction and selecting the proper model framework. River flow has dynamic and nonlinear nature. Phase space is defined as the space which includes all the possible conditions which describe a system, in dynamic systems. Because of the inaccessibility of exact mathematical equations of system, it is difficult to clearly identify the phase space; moreover all the available information is a scalar time series. Therefore, the embedding method with exerting delay times on river flow time series, is used in order to reconstruct the phase space. The objective of current research is to evaluate the effects of temporal scales and time series fluctuations on chaotic analysis, including phase space reconstruction and chaotic behavior of time series.

Materials and Methods: The study site is Nazloo chai sub basin, which is located in the Urmia lake basin (west of the Lake). The watershed area is about 2917.1 km² and the average height of region is 1720 m. the slope of the river is 0.3%. There is no storage dam on the river. The runoff data of Nazloo chai river was obtained from Tapic hydrometric station in daily, weekly and monthly scales, from 1990 up to 2011 statistical period. The reconstruction of phase space was performed in three different temporal scales (daily, weekly and monthly), in order to determine the dynamic behavior of the system and the regularity pattern of the river flow. For this purpose, delay time was calculated using AMI (Average Mutual Information) method. Moreover the proper embedding dimension was calculated using FNN (False Nearest Neighbors) method. Chaotic behavior of river flow for daily, weekly and monthly scales was evaluated by using correlation dimension and Hurst exponent methods.

Results: In this study the daily, weekly and monthly observed discharges data of Nazloo chai River have been used to reconstruct the phase space from 1990 to 2011. Delay time was calculated by AMI method and it is 39 for daily, 18 for weekly and 9 for monthly scale. Embedding dimension as a minimum dimension for reconstruction of phase space to describe the dynamic system was calculated using FNN method for daily, weekly and monthly scales and were 26, 8 and 4 respectively. Chaotic behavior of river flow for daily, weekly and monthly scales was evaluated by using correlation dimension and Hurst exponent methods. Correlation dimension was 2.8 for daily, 3.62 for weekly and 5.52 for monthly scale. Hurst exponent for daily, weekly and monthly scales was obtained 0.84, 0.77 and 0.76 respectively.

Conclusion: The results illustrate the chaotic behavior of the river flow in all studied time scales.

Keywords: Chaos theory, Embedding dimension, Correlation dimension, Hurst exponent

* Corresponding Author; Email: h.rezaie@urmia.ac.ir

